

文章编号: 1000-4750(2006)10-0141-04

孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响

*王海龙, 李庆斌

(清华大学水利系, 北京 100084)

摘 要: 湿态混凝土受压时会产生孔隙水压力, 孔隙水压力的产生给混凝土的力学性能带来一些影响, 但是目前这方面的理论研究甚微。尝试利用断裂力学的方法, 来探讨湿态混凝土在承受单轴压缩荷载时, 孔隙水压力对混凝土开裂、扩展和抗压强度的影响。研究表明: 混凝土中的孔隙水压力减小了阻碍混凝土开裂的摩阻力, 相当于楔体的“楔入”作用, 加速了混凝土的损伤和微裂纹的扩展, 与干燥态的混凝土相比, 湿态混凝土的开裂应力和抗压强度都有所降低。

关键词: 混凝土结构; 孔隙水压力; 单轴压缩; 开裂; 强度

中图分类号: TB301 文献标识码: A

EFFECT OF PORE WATER ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF WET CONCRETE

*WANG Hai-long, LI Qing-bin

(Department of hydraulic and hydropower engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The compressive strength of wet concrete influenced by pore water is investigated in this paper. Pore water pressure induced by compression in the wet concrete affects the mechanical properties of concrete, but the related research is little. The magnitude of pore pressure relates with the volumetric deformation of concrete and the developing velocity of cracks. Based on fracture mechanics, the effects of pore water on the initiation of crack, the development of crack and the strength of wet concrete are analyzed. The results of this investigation indicate that the pore water decreases the friction force which baffles the development of crack and accelerates the damage of concrete, and the pore pressure acts as a wedge to the crack of concrete. The initiation stress of crack and the compressive strength of wet concrete are decreased comparing with the dry sample.

Key words: wet concrete; pore water pressure; uniaxial compression; crack; compressive strength

混凝土结构经常在水环境中工作, 如大坝、过河桥梁的基础及墩台、海岸及近海岸的结构物、海洋采油平台等等。由于混凝土中具有大量的毛细管和孔隙, 在水压力的作用下, 水就会渗透到混凝土的孔隙和裂缝中。受各种荷载的影响, 混凝土中的孔隙水会对孔壁产生水压力, 给混凝土的受力性能带来一些影响。

已有试验研究表明: 饱和混凝土在较慢的加载速率下强度有所降低^[1~4]。但是他们的研究多是在试验的基础之上给出定性的描述, 缺乏理论研究和定量的解释。本文从断裂力学入手, 根据普通混凝土中裂缝的发生、发展直至破坏的机理, 对孔隙水压力作用下的湿态混凝土的受力性能进行一些讨论。

收稿日期: 2005-01-27; 修改日期: 2005-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50225927, 90210010)

作者简介: *王海龙(1974), 男, 江苏人, 博士生, 从事混凝土材料及结构等方面的研究(E-mail: hl-wang02@mails.tsinghua.edu.cn);

李庆斌(1964), 男, 河南人, 教授, 博士, 博导, 从事混凝土材料和水工结构等方面的研究(E-mail: qingbinli@tsinghua.edu.cn)。

1 湿态混凝土中的孔隙水压力

湿态混凝土中的孔隙水压力主要与混凝土的体积变形有关。当混凝土的体积变形处在压缩状态时,混凝土中孔隙水压力随着外部荷载的增长而逐渐增加,且增量为正;随着损伤的发展,混凝土体积发生膨胀,混凝土中的孔隙水压力有所减小,增量为负。文献[5]研究了混凝土体积变形处于压缩状态时孔隙水压力与变形之间的关系。研究量测了3天和7天的混凝土饱和与非饱和试件的孔隙水压力和总的变形及应力,结果表明随着外荷载的增加和试件压缩变形,孔隙水压力逐渐增长与总的压力和变形呈线性关系。

混凝土中的孔隙水压力与混凝土的养护湿度及混凝土的饱和度紧密相关,对于非饱和状态的混凝土,其孔隙水压力较小;对于饱和状态的混凝土,在外压力的作用下,其孔隙水压力较大。

混凝土中的孔隙水压力还与裂缝的开展速度有关,当裂缝的开展速度较慢时,裂缝中的水很容易推进到裂缝的缝端,促进裂缝的扩展;当裂缝的开展速度较快时,裂缝中的水压力较低,裂缝的开展受水的影响不如前者明显。

综合以上诸多因素,在研究孔隙水压力对混凝土静强度的影响时,可以采用以下的模型

$$\begin{cases} p = a_1(\varepsilon_v, S, V)\sigma, & \sigma \leq \sigma_c; \\ p = a_2(\varepsilon_v, S, V, D)\sigma, & a_2 < a_1, \sigma > \sigma_c. \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 为孔隙水压力; a_1 、 a_2 分别为混凝土体积处于压缩和膨胀状态时联系孔隙水压力与外载之间关系的系数,其大小与体积变形 ε_v 、饱和度 S 和裂缝的开展速度 V 有关;此外 a_2 还与混凝土的损伤程度 D 有关; σ_c 为混凝土体积压缩达到最大时的应力值。

2 孔隙水压力对混凝土单轴受压性能的影响

细观层次上,混凝土的开裂到破坏主要经历如图1所示的三个阶段^[6,7]:受泌水以及骨料和基体的不一致变形等因素的影响,混凝土初始裂纹多发生在骨料和硬化水泥浆的界面处,长度为 $2L_1$;对于普通混凝土来说硬化水泥砂浆基体的强度大于界面处材料的强度,所以随着荷载的增加,裂纹沿界面发生扩展,当达到 $2L_2$ 时微裂纹进入基体;再随着外荷载的增加,基体中产生分枝裂缝,分枝长度

为 L_3 ,当 L_3 发展到一定的长度时,混凝土中的裂纹发生汇合、串接而形成主裂纹,混凝土试件发生破坏。

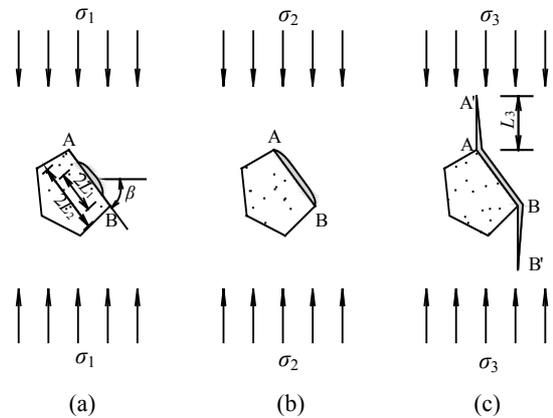


图1 单压情况下混凝土开裂示意图

Fig.1 Development of crack in the concrete under uniaxial compression

2.1 湿态混凝土的开裂应力

如图1(a)所示,在一无限体中有一多边形骨料,其AB边上存在着一长度为 $2L_1$ 的初始微裂纹,与水平方向的夹角为 β ,当压缩荷载达到裂缝扩展的临界荷载 σ_1 时,裂缝开始沿着界面AB发生不稳定的扩展,此时裂纹面上的正应力为

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \beta - p \quad (2)$$

压缩应力作用下的裂纹多为闭合型,对于闭合型裂纹,裂纹面上的正应力对剪切断裂起到抑止作用,裂纹面上的有效剪应力为

$$\tau_{eff} = \sigma_1 \cos \beta \sin \beta - f(\sigma_1 \cos^2 \beta - p) \quad (3)$$

式中: f 为裂缝产生相对滑动时的摩擦系数。本文主要计算压缩荷载下湿态混凝土的强度,所以以压为正。由式(2)可以看出,孔隙水压力减小了裂纹面上的正应力,对裂纹的发展有促进作用。

但是当孔隙水压力足够大($\sigma_n < 0$),使得界面裂纹变为张开型裂纹时,裂纹面上的剪应力为

$$\tau_{eff} = \sigma_1 \cos \beta \sin \beta \quad (4)$$

当 $\sigma_1 \cos^2 \beta - p > 0$ 时,在外载和孔隙水压力作用下湿态混凝土中裂纹发生II型开裂,其应力强度因子为

$$K_{II} = [\sigma_1 \cos \beta \sin \beta - f(\sigma_1 \cos^2 \beta - p)]\sqrt{\pi L_1} \quad (5)$$

当 $K_{II} = K_{IIC}^{Int}$ (K_{IIC}^{Int} 为混凝土界面发生II型断裂时的断裂韧度)时,混凝土发生开裂,开裂荷载 σ_1 为

$$\sigma_1 = \frac{K_{IIC}^{Int}}{[fa_1 + q(\beta, f)]\sqrt{\pi L_1}} \quad (6)$$

其中： $q(\beta, f) = \cos \beta \sin \beta - f \cos^2 \beta$ 。

当 $\sigma_1 \cos^2 \beta - p < 0$ 时，湿态混凝土的应力强度因子为

$$K_I = (p - \sigma_1 \cos^2 \beta) \sqrt{\pi L_1} \quad (7)$$

$$K_{II} = \sigma_1 \cos \beta \sin \beta \sqrt{\pi L_1} \quad (8)$$

对于 I、II 复合型断裂，其断裂判据采用如下的拉剪复合断裂准则^[8]

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^2 + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

将式(1)、式(7)和式(8)代入式(9)就可以得到此种情况下的开裂荷载 σ_1 。

2.2 裂纹进入湿态混凝土基体时的临界荷载

由于混凝土基体(硬化的水泥砂浆)的断裂韧度 $K_{IIC}^M > K_{IIC}^{Int}$ ，所以随着外加压缩荷载的增加裂缝沿着 AB 面继续发展，当剪切裂缝发展到如图 2(b)所示的形式时，闭合微裂纹的 II 型应力强度因子逐渐增大，并沿微裂纹前缘产生较大的拉伸应力，而混凝土基体材料抵抗拉应力的能力较差，因此可以采用最大拉应力作为微裂纹弯折扩展的判据。闭合微裂纹弯折扩展准则为^[8]

$$K_{II} = \frac{\sqrt{3}}{2} K_{IC}^M \quad (10)$$

式中： K_{IC}^M 为混凝土基体发生 I 型断裂时的断裂韧度。应力强度因子 K_{II} 为

$$K_{II} = \tau_{eff2} \sqrt{\pi L_2} \quad (11)$$

其中： $\tau_{eff2} = \sigma_2 \cos \beta \sin \beta - f(\sigma_2 \cos^2 \beta - a_2 \sigma_2)$

将式(11)代入式(10)可以得到当裂纹进入混凝土基体时所需的外界临界荷载 σ_2 为

$$\sigma_2 = \frac{K_{IC}^M \sqrt{3} / 2}{[fa_2 + q(\beta, f)] \sqrt{\pi L_2}} \quad (12)$$

2.3 湿态混凝土的抗压强度

对于如图 1(c)中所示的分枝型裂纹，随着外载的增加裂纹发生扩展，现有的研究认为此时裂纹的扩展可采用 I 型断裂准则来进行判断^[9-11]，对于干燥的分枝裂纹在单轴压缩荷载作用下的应力强度因子为^[12,13]

$$K_I = \frac{2L_2 \tau_{eff} \cos \beta}{\sqrt{\pi L_3}} \quad (13)$$

对于实验室条件下的饱和混凝土试件来说，在单轴压缩荷载作用下，随着湿混凝土损伤的积累，孔隙中的水压力逐渐减小，斜裂纹面上的正应力一般大于零，此时在外荷载和孔隙水压力的作用下，分枝

裂纹的应力强度因子为

$$K_I = \frac{2L_2 \tau_{eff} \cos \beta}{\sqrt{\pi L_3}} + p \sqrt{\pi L_3} \quad (14)$$

其中： $\tau_{eff} = \sigma \cos \beta \sin \beta - f(\sigma \cos^2 \beta - a_2 \sigma)$

通常认为当分枝裂纹的长度达到破坏特征长度 L_c 时，混凝土裂纹发生串接，试件发生断裂，此时所需的外载认为是湿态混凝土的断裂强度 σ_3

$$\sigma_3 = \frac{K_{IC}^M \sqrt{\pi L_c}}{2L_2 q(\beta, f) \cos \beta + a_2 \pi L_c + 2L_2 f a_2 \cos \beta} \quad (15)$$

实际上，当混凝土中分枝裂纹发展到一定长度以后，裂纹之间的相互影响不应忽略，而式(13)和式(14)没有考虑混凝土裂纹之间的相互作用，因此采用图 2 模型来计算湿混凝土的抗压强度。

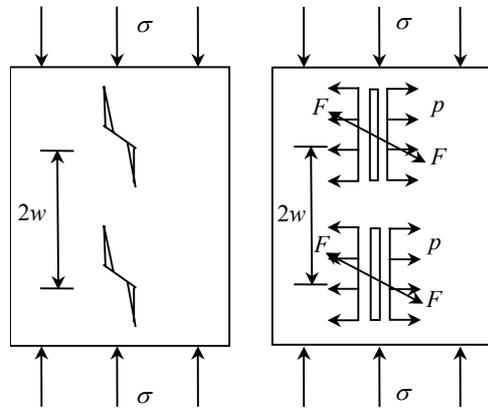


图 2 相互影响的两个裂纹及其等效形式

Fig.2 Two cracks that influencing each other and the equivalent model

考虑两个裂纹相互影响时，弯折裂纹的应力强度因子为

$$K_I = \frac{F \cos \beta}{\sqrt{w \sin \left(\frac{\pi L_3}{w}\right)}} + p \sqrt{2w \tan \left(\frac{\pi L_3}{2w}\right)} \quad (16)$$

其中： $F = 2L_2 \tau_{eff}$

当 $K_I = K_{IC}^M$ ， $L_3 = w - L_2 \sin \beta$ 时，微裂纹发生串接，宏观裂缝形成，湿混凝土试件的抗压强度 σ_3 为

$$\sigma_3 = K_{IC}^M / T(\cdot) \quad (17)$$

其中：

$$T(\cdot) = \frac{2L_2 \cos \beta [\cos \beta \sin \beta - f(\cos^2 \beta - a_2)]}{\sqrt{w \sin \left(\frac{\pi L_2 \sin \beta}{w}\right)}} + a_2 \sqrt{2w \cot \left(\frac{\pi L_2 \sin \beta}{2w}\right)}$$

3 计算与分析

现根据文献[14]中的材料试验参数来计算不同倾角和不同孔隙水压力下混凝土的开裂应力和抗压强度等，计算中取 $K_{IC}^{Int} = 0.165\text{MN/m}^{3/2}$ ， $K_{IIC}^{Int} = 0.33\text{MN/m}^{3/2}$ ， $K_{IC}^M = 0.495\text{MN/m}^{3/2}$ ；微裂纹的统计平均半径 $L_1 = 0.47\text{cm}$ ， $L_2 = 0.81\text{cm}$ ；摩擦因数 $f = 0.25$ ；混凝土发生断裂时 $w = 4L_2$ ； a_1 、 a_2 的取值如图 3~图 5 中所示；对于闭合型裂纹，计算结果见图 3~图 5。

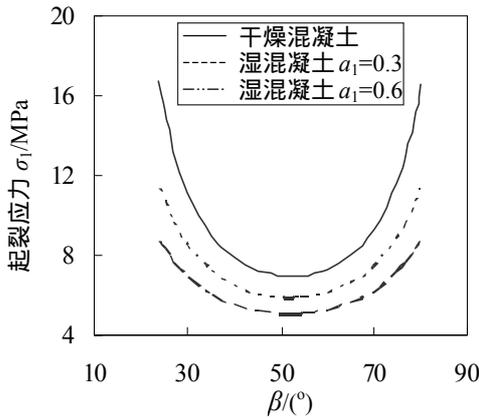


图 3 不同倾角不同孔隙水压力下混凝土的起裂应力

Fig.3 The initiation stress of wet concrete under different pore pressure and different inclination angles

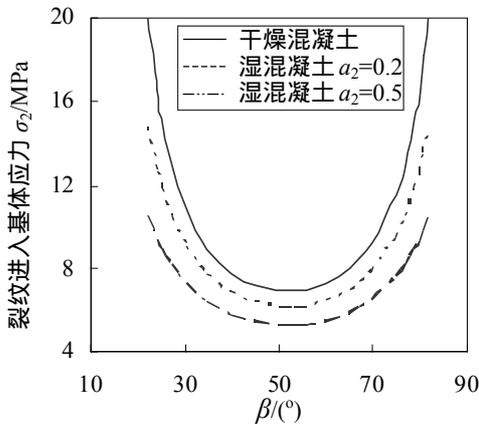


图 4 裂纹发生弯折时的应力

Fig.4 The stress of wet concrete when crack develops into cement matrix

由图 3、图 4 和图 5 可以看出：湿态混凝土中的孔隙水压力相当于楔体的“楔入”作用，促进了

裂纹的发生和发展，降低了混凝土的强度，且孔隙水压力对断裂强度的影响更为显著；孔隙水压力越大混凝土越容易开裂，混凝土的强度越低。混凝土开裂和断裂强度与混凝土中初始斜裂纹的倾角有关，混凝土的开裂总是从最容易起裂的界面斜裂纹开始，然后逐渐串接断裂破坏，从图 3 可以得到干、湿态混凝土的最易开裂角度，也可以看出湿态混凝土最易发生开裂和断裂破坏时的斜裂纹倾角略小于干燥混凝土。

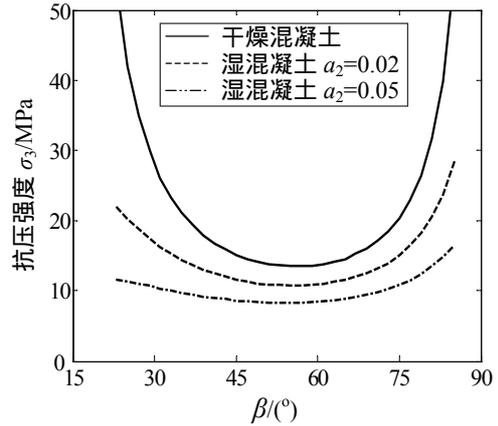


图 5 不同孔隙水压力下湿混凝土的抗压强度

Fig.5 The compressive strength of wet concrete under different pore pressure and different inclination angles

4 结论

湿态混凝土受压时孔隙中产生孔隙水压力，孔隙水压力的大小与混凝土的体积变形、饱和度、以及裂缝的开展速度有关。在计算孔隙水压力的大小时要综合考虑这几个主要因素的影响。在加载速率较慢时，根据混凝土体积变形情况，单轴压缩荷载下混凝土中的孔隙水压力可以根据式(1)来进行计算。

混凝土的开裂和强度不仅与混凝土中初始斜裂纹的倾角有关，而且与孔隙水压力的大小有关。孔隙水压力的出现降低了裂纹面上的正应力，从而减小了抑止混凝土开裂的摩阻力。孔隙水压力相当于楔体的“楔入”作用，促进了混凝土的开裂和裂纹的扩展，与干燥态的混凝土相比，湿态混凝土的断裂强度有所降低。

- 1979.
- Xu Huafang. Foundations of aerodynamics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979. (in Chinese)
- [3] Ricciardelli F, Hangan H. Pressure distribution, aerodynamic forces and dynamic response of box bridge sections [J]. *Wind and Structures*, 2001, 4(5): 399~412.
- [4] Larose G L, Tanaka H, Gising N J, Dyrbye C. Direct measurement of buffeting with forces on bridge decks [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74~76: 809~818.
- [5] Stommen E, Hjorth-Hansen E, Kaspersen J H. Dynamic loading effects of a rectangular box girder bridge [C]. BBAIV, Bochum, Germany, 2000. 51~54.
- [6] Frandsen J B. Simultaneous pressures and accelerations measured full-scale on the Great belt East suspension bridge [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89: 95~129.
- [7] 李加武. 桥梁断面雷诺数效应及其控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- Li Jiawu. Research on reynolds-number effects of bridge deck section and the effect-restraint [D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)
- [8] 殷峰. 桥梁断面气动力和气动导数的表面测压法试验识别[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- Yin Feng. Identification of aerodynamic forces and flutter derivatives of bridge decks by pressure measurement approach [D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)
- [9] Gunter Schewe, Allan Larsen. Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge deck cross section [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74~76: 829~838.
- [10] Kubo Y, Nogami C, Yamaguchi E, Kato K, Niihara Y, Hayashida K. Study on reynolds number effect of a cable-stayed bridge girder [C]. *Wind Engineering into the 21st Century*, 1999. 935~940.
- [11] 金挺. 扁平箱形桥梁断面气动特性的雷诺数效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- Jin Ting. Reynolds number effects on aerodynamic characteristics of flat-box girder bridge decks [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)

(上接第 144 页)

参考文献:

- [1] Yaman I O, Hearn N, Aktan H M. Active and non-active porosity in concrete part I: Experimental evidence [J]. *Material and Structure*, 2002, 35(3): 102~109.
- [2] Yaman I O, Hearn N, Aktan H M. Active and non-active porosity in concrete part II: Evaluation of existing models [J]. *Material and Structure*, 2002, 35(3): 110~116.
- [3] Rossi P, Van Mier J G M, Boulay C. The dynamic behaviour of concrete: Influence of free water [J]. *Material and Structure*, 1992, 25: 509~514.
- [4] Ross C A, Jerome D M, Tedesco J W. Moisture and strain rate effects on concrete strength [J]. *ACI Material J*, 1996, 93(3): 293~300.
- [5] Oshita H, Tanabe, Water migration phenomenon in concrete in prepeak region [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(6): 565~572.
- [6] 宋玉普. 多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- Song Yupu. Constitutive equations and failure criteria of multi-type concrete [M]. Beijing: Water Publishing House of China, 2002. (in Chinese)
- [7] 江见鲸, 冯乃谦. 混凝土力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- Jiang Jianjing, Feng Naiqian. *Mechanics of concrete* [M]. Beijing: Railway press of China, 1991. (in Chinese)
- [8] 冯西桥, 余寿文. 准脆性材料细观损伤力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- Feng Xiqiao, Yu Shouwen. *Damage micromechanics of quasi-brittle materials* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
- [9] Li S, Lajtai E Z. Modeling the stress-strain diagram for brittle rock loaded in compression [J]. *Mechanics of Materials*, 1998, 30: 243~251.
- [10] Li C, Prikryl R, Nordlund E. The stress-strain behaviour of rock material related to fracture under compression [J]. *Engineering Geology*, 1998, 49: 293~302.
- [11] Lee S, Ravichandran G. Crack initiation in brittle solids under multiaxial compression [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70: 1645~1658.
- [12] Kemeny J M. A model for nonlinear rock deformation under compression due to subcritical crack growth [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1991, 28: 459~467.
- [13] Gambarotta L, Monetto I. Uniaxial compressive failure of brittle materials as instability of damaging microcracked solids [J]. *European Journal of Mechanics*, 2002, 21: 121~132.
- [14] Lee X, Ju J W. Micromechanics damage models for brittle solids II: Compressive loadings [J]. *J Eng Mech*, 1991, 117: 1515~1536.